



普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材  
高校土木工程专业规划教材  
GAOXIAO TUMU GONGCHENG ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI

# 土木工程结构试验

(第二版)

熊仲明 王社良 编著

TUMU GONGCHENG JIEGOU SHIYAN

中国建筑工业出版社

普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材  
高校土木工程专业规划教材

# 土木工程结构试验

## (第二版)

熊仲明 王社良 编著

## 图书在版编目 (CIP) 数据

土木工程结构试验/熊仲明, 王社良编著, —2 版. —北京: 中国建筑工业出版社, 2014. 12

普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材. 高校土木工程专业规划教材

ISBN 978-7-112-17542-0

I. ①土… II. ①熊…②王… III. ①土木工程-工程结构-结构试验-高等学校-教材 IV. ①TU317

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 274994 号

本书为高等院校土木工程的专业课教材, 内容包括结构试验概论、结构试验设计、结构试验的荷载与加载设备、结构试验的量测技术、工程结构静载试验、结构动力试验、结构抗震试验、工程结构模型试验、建筑结构可靠性检测鉴定的基本理论与基本方法、建筑结构可靠性的检测鉴定、结构试验的数据处理等。全书按照《高等学校土木工程本科指导性专业规范》以及最新颁布的国家标准和规范编写。书中还配有光盘, 为无试验设备或试验条件较差的学校学生学习本课程, 创造一定条件。每章附有小结、思考题等, 便于学生自学和进一步提高。

本书可供高等院校土木工程专业本科生作为教材使用, 也可供结构工程、防灾减灾工程专业研究生、从事结构试验的专业人员和有关工程技术人员作为参考用书。

责任编辑: 王 跃 吉万旺

责任校对: 李美娜 党 蕾

普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材

高校土木工程专业规划教材

土木工程结构试验

(第二版)

熊仲明 王社良 编著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京盈盛恒通印刷有限公司印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 16 字数: 385 千字

2015 年 6 月第二版 2015 年 6 月第十一次印刷

定价: 39.00 元 (含光盘)

ISBN 978-7-112-17542-0

(26755)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

## 第二版前言

本次《土木工程结构试验》教材的修订，从内容上看，是完全结合《土木工程指导性专业规范》的修订工作而进行的。特别对土木工程试验操作和检验标准，既有建筑物可靠性的检测鉴定和可靠度评级标准等内容进行了较大的修订。

本书的特点是内容全面、系统性强。为了满足教学要求，本书保持了第一版的特色，对部分章节在内容上重新进行了编排，同时对第一版在使用中发现的一些问题和不足进行了修正，适当地增加了新的内容。

参加本书修订工作的有：熊仲明（1、2、8章）、王林科（3、9、10）、马乐为（4章）、王社良、朱军强（5、11章）、赵歆冬（6、7章）、霍晓鹏（光盘）。全书最后由熊仲明、王社良修改定稿。

西安建筑科技大学土木工程学院混凝土教研室全体同仁在本书编写及修订过程中给予了热情支持和帮助，西安建筑科技大学将《土木工程结构试验》列为重点建设教材，研究生陈轩在本次修订过程中做了大量工作，特此表示感谢。

本书在编写过程中参考了大量国内外文献，引用了一些学者的资料，这在本书末的参考文献中已予列出。

限于编者水平，书中难免有遗漏之处，敬请读者批评指正。

编者

2014年10月

## 第一版前言

土木工程结构试验是研究和发展土木工程结构新材料、新结构、新施工工艺及检验结构计算分析和设计理论的重要手段，在土木工程结构科学研究和技术创新等方面起着重要作用。通过本课程关于结构试验理论和试验技能的学习，切实培养学生的科研能力。结合结构专业（钢结构、钢筋混凝土结构、砌体结构）知识，独立制订出结构试验加荷方案、测试方案。经试验获得数据后，对试验数据进行处理、分析，最后得出结论。要求学生掌握基本构件检测性试验，包括制订试验方案、分析试验现象、处理试验数据的全过程。

在内容上本教材完全按照《高等学校土木工程专业本科生教育培养目标和培养方案及教学大纲》的要求编写，结构体系完整，循序渐进，理论与实践结合紧密，并配有光盘，为无试验设备或试验条件较差的学校学生学习本课程，创造一定条件，便于学生自学和进一步提高。另外，为适应双语教学的需要，书中同时相应地给出部分英文专业术语，以便应用。

本教材完全按照最新教学大纲，考虑了以往类似教材的不足，把新的试验设备、新的试验方法及最新的设计规范规定引入到各章节中，并克服了以往教材的章后无小结、无习题的缺陷，在每章后均有小结并配有一定数量的思考题，以便于学生对所学知识的巩固和掌握。

本书的特点是内容全面、系统性强，以结构试验的基本理论和基础知识为重点，在主要章节还附有详细的应用实例或试验示例，便于读者理解和掌握结构试验的基本技能，注意理论与实践相结合。本书可供高等院校土木工程专业本科生作为教材使用，也可供结构工程、防灾减灾工程专业研究生，以及从事结构试验的专业人员和有关工程技术人员作为参考用书。

本书由西安建筑科技大学土木学院部分教师编写。第1、2、8章由熊仲明执笔，第3、9、10章由王林科执笔，第4章由马乐为执笔，第5、11章由王社良、朱军强执笔，第6、7章由赵歆冬执笔，光盘由熊仲明、霍晓鹏制作，全书最后由熊仲明、王社良修改定稿。

资深教授赵鸿铁先生对全书进行了审阅，并提出了许多宝贵的意见，张兴虎高级工程师对本书的出版也提出了许多建议，霍晓鹏为本书编制了部分插图，西安建筑科技大学土木工程学院混凝土教研室以及陕西省结构与抗震重点实验室全体同仁在本书的编写过程中给予了热情支持和帮助，西安建筑科技大学教务处将本书列为校级十五规划重点教材，并给予资助，特在此对他们表示感谢。

本书在编写过程中参考了大量国内外文献，引用了一些学者的资料，这在本书末的参考文献中已予列出。

由于编者水平有限以及时间仓促，书中不妥之处，敬请读者批评指正。

编者

2006年4月

# 目 录

<b>第 1 章 结构试验概论</b> .....	1
1.1 概述 .....	1
1.2 工程结构试验的任务 .....	2
1.3 结构试验的分类 .....	2
1.4 结构试验的发展 .....	7
本章小结 .....	8
思考题 .....	8
<b>第 2 章 结构试验设计</b> .....	9
2.1 结构试验设计的一般程序 .....	9
2.2 结构试验的构件设计 .....	11
2.3 结构试验荷载设计 .....	15
2.4 结构试验的量测方案设计 .....	17
2.5 材料的力学性能与结构试验的关系 .....	19
2.6 试验大纲及其他文件 .....	22
本章小结 .....	23
思考题 .....	24
<b>第 3 章 结构试验的荷载与加载设备</b> .....	25
3.1 概述 .....	25
3.2 重力加载法 (gravity load) .....	25
3.3 液压加载法 (hydraulic load) .....	27
3.4 其他加载方法 .....	33
3.5 荷载支承设备和试验台座 (strutting facilities and experimental platform) .....	34
本章小结 .....	40
思考题 .....	41
<b>第 4 章 结构试验的量测技术</b> .....	42
4.1 概述 .....	42
4.2 应变量测 .....	43
4.3 力的量测 .....	57
4.4 位移与变形的量测 .....	58
本章小结 .....	61
思考题 .....	62
<b>第 5 章 工程结构静载试验</b> .....	63
5.1 概述 .....	63
5.2 试验前的准备 .....	64
5.3 加载与量测方案的设计 .....	68
5.4 常见结构构件静载试验 .....	70

5.5	量测数据整理	88
5.6	结构性能的检验与评定	97
	本章小结	101
	思考题	102
<b>第6章</b>	<b>结构动力试验</b>	<b>103</b>
6.1	概述	103
6.2	结构动力试验的量测仪器	103
6.3	结构动力特性测试试验	113
6.4	结构疲劳试验	117
	本章小结	121
	思考题	121
<b>第7章</b>	<b>结构抗震试验</b>	<b>123</b>
7.1	概述	123
7.2	拟静力试验 (pseudo-static method of structural test)	123
7.3	结构抗震性能的评定	127
7.4	拟动力试验 (Pseudo-dynamic Test Method)	130
7.5	模拟地震振动台试验 (Pseudo-earthquake Shaking Table Test)	132
	本章小结	133
	思考题	134
<b>第8章</b>	<b>工程结构模型试验</b>	<b>135</b>
8.1	概述	135
8.2	模型试验理论基础	136
8.3	模型设计	146
8.4	模型材料的选择	150
	本章小结	152
	思考题	153
<b>第9章</b>	<b>建筑结构可靠性检测鉴定的基本理论与基本方法</b>	<b>154</b>
9.1	建筑结构的可靠性与可靠度	154
9.2	既有建筑结构 (existing building structure) 可靠性鉴定 (appraisal of reliability)	155
9.3	既有建筑可靠性评级标准 (appraising standard) 与评级方法 (appraising method)	160
9.4	既有建筑结构可靠性的计算、分析 (calculating、analysing)	166
	本章小结	167
	思考题	168
<b>第10章</b>	<b>建筑结构可靠性的检测鉴定</b>	<b>169</b>
10.1	钢筋混凝土结构 (reinforced concrete structure) 的检测鉴定与等级评定 (grade assessment)	169
10.2	钢结构 (steel structure) 的检测鉴定	186
10.3	砌体结构 (masonry structure) 的检测鉴定	193
10.4	结构构件的维修与补强加固 (repairing and strengthening for structural member)	197
	本章小结	205
	思考题	206
<b>第11章</b>	<b>结构试验的数据处理</b>	<b>208</b>

11.1 概述 .....	208
11.2 数据的整理和换算 .....	208
11.3 数据的统计分析 .....	212
11.4 误差分析 .....	215
11.5 数据的表达方式 .....	221
11.6 信号处理及分析 .....	229
本章小结 .....	243
思考题 .....	244
<b>参考文献</b> .....	<b>245</b>



# 第1章 结构试验概论

## 1.1 概 述

建筑结构试验 (building structure test) 是一项科学性、实践性很强的活动, 是研究和发展工程结构新材料、新体系、新工艺以及探索结构设计新理论的重要手段, 在工程结构科学研究和技术革新等方面起着重要的作用。

科学研究理论往往需要在实践中证实。对工程结构而言, 确定材料的力学性能, 建立复杂结构计算理论, 验证梁、板、柱等一些单个构件的计算方法, 都离不开具体的试验研究。因此, 工程结构试验与检测是研究和发展结构计算理论不可缺少的重要环节。

今天, 由于电子计算机的普遍应用, 建筑结构的设计方法和设计理论发生了根本性的变化, 把以前需要手工计算难以精确分析的复杂结构问题, 凭借计算机简而化之。但试验在结构科研、设计和施工中的地位并没有因此而改变。由于测试技术的进步, 迅速提供精确可靠的试验数据比过去更加受到重视。试验仍是解决建筑结构工程领域科研和设计出现新问题时必不可少的手段。其原因主要有以下几个方面:

### (1) 建筑结构试验是人们认识自然的重要手段

认识的局限性使人们对诸如结构的材料性能等还缺乏真正透彻的了解。例如, 在进行结构动力反应分析时要用到的阻尼比至今不能用分析的方法求得。正是试验手段的应用, 拓宽了人们认识的局限性。

### (2) 建筑结构试验是发现结构设计问题的重要环节

建筑设计技术发展到了 20 世纪 80 年代, 为满足人们对建筑空间的使用需要, 出现了异形截面柱, 如“T”形、“L”形和“十”形截面柱。在未做试验研究之前, 设计者认为, 矩形截面柱和异形截面柱在受力特性方面没有区别, 其区别就在于截面形式不同, 因而误认为柱的受力特性与截面形式无关。通过试验发现, 柱的受力特性与柱截面的形状有很大关系: 矩形截面柱的破坏特征属拉压型破坏, 异形截面破坏特性属剪切型破坏。

### (3) 建筑结构试验是验证结构理论的有效方法

从最简单的结构受弯杆件截面应力分布的平截面假定理论、弹性力学平面应力问题中应力集中现象的计算理论到比较复杂的、不能对研究问题建立完善的数学模型结构平面分析理论和结构空间分析理论, 以及隔震结构、耗能结构的理论发展都离不开试验这种有效的方法。

### (4) 建筑结构试验是建筑结构质量鉴定的直接方式

对于已建的结构工程, 无论灾害后的建筑工程还是事故后的建筑工程, 无论是某一具体的结构构件还是结构整体, 任何目的的质量鉴定, 所采用的直接方式仍是结构试验。

### (5) 建筑结构试验是制定各类技术规范和技术标准的基础

我国现行的各种结构设计规范在制定过程中总结已有的大量科学试验的研究成果和经

验，同时为设计理论和设计方法的发展，进行了大量钢筋混凝土结构、砖石结构和钢结构的梁、柱、框架、节点、墙板、砌体等足尺和缩尺模型的试验，以及实体建筑物的试验研究，为我国编制各种结构设计规范提供了基本资料和试验数据。

(6) 建筑结构试验是自身发展的需要

自动控制系统和电液伺服加载系统在结构试验中的广泛应用，从根本上改变了试验加载的技术；由过去的重力加载逐步改进为液压加载 (hydraulic loading)，进而过渡到低周反复加载 (reversed low-cyclic loading)、拟动力加载 (pseudo-dynamic loading) 及地震模拟随机振动台 (earthquake simulation shaking table) 加载等。在试验数据的采集和处理方面，实现了量测数据的快速采集、自动化记录和数据自动处理分析等。这些都是建筑结构试验自身发展的产物。

建筑结构试验是土木工程专业的一门技术基础课程。它研究的主要内容包括：工程结构静力试验和动力试验的加载模拟技术，工程结构变形参数的量测技术，试验数据的采集、信号分析及处理技术，以及对试验对象作出科学的技术评价或理论分析。

学习本课程的目的是通过理论和试验的教学环节，使学生掌握结构试验方面的基本知识和基本技能，并能根据设计、施工和科学研究任务的需要，完成一般建筑结构的试验设计与试验规划，为今后从事建筑结构的科研、设计或施工等工作增加一种解决问题的方法。

## 1.2 工程结构试验的任务

结构在外荷载作用下，可能产生各种反应。结构试验的任务就是在结构物或试验对象上，使用仪器设备和工具，采用各种试验技术手段，在荷载或其他因素作用下，通过量测与结构工作性能有关的各种参数，从强度、刚度、抗裂性以及结构实际破坏形态来判明结构的实际工作性能，估计结构的承载力，确定结构对使用要求的符合程度，并用以检验和发展结构的计算理论。例如：

(1) 钢筋混凝土简支梁在静力集中荷载作用下，通过测得梁在不同受力阶段的挠度、角变位、截面上纤维应变和裂缝宽度等参数来分析梁的整个受力过程及结构的承载力、刚度和抗裂性能。

(2) 当一个框架承受水平动力荷载作用时，同样可以从测得结构的自振频率、阻尼系数、振幅和动应变等研究结构的动力特性和结构承受动力荷载作用下的动力反应。

(3) 在结构抗震研究中，经常是通过低周反复荷载作用下，由试验所得的应力与变形关系的滞回曲线 (hysteresis curve) 来分析抗震结构的承载力、刚度、延性、刚度退化和变形能力等。

因此，结构试验的任务是以试验方式测定有关数据，由此反映结构或构件的工作性能、承载能力和相应的安全度，为结构的安全使用和设计理论的建立提供重要依据。

## 1.3 结构试验的分类

结构试验可按试验目的、试验对象的尺寸、荷载的性质、作用时间的长短、所在场地

情况等因素进行分类。

### 1.3.1 根据不同试验目的的分类

根据不同试验目的，结构试验可分为生产性试验和科研性试验两大类。

#### 1. 生产性试验

这类试验经常具有直接的生产目的。它以实际建筑物或结构构件为试验鉴定对象，经过试验对具体结构构件作出正确的技术结论，常用来解决以下有关问题：

##### (1) 综合鉴定重要工程和建筑的设计与施工质量

对于一些比较重要的结构与工程，除在设计阶段进行大量必要的试验研究外，在实际结构建成后，还要求通过试验，综合鉴定其质量的可靠程度。

##### (2) 对已建结构进行可靠性检验，以推断和估计结构的剩余寿命

已建结构随着建造年代和使用时间的增长，结构物逐渐出现不同程度的老化现象，有的已到了老龄期、退化期或更换期，有的则到了危险期。为了保证已建建筑物的安全使用，尽可能地延长它的使用寿命和防止建筑物的破坏、倒塌等重大事故的发生，国内外对建筑物的使用寿命，尤其对使用寿命中的剩余期限，即剩余寿命特别关注。通过对已建建筑物的观察、检测和分析普查，按可靠性鉴定规程评定结构所属的安全等级，由此来判断其可靠性和评估其剩余寿命。可靠性鉴定大多采用非破损检测的试验方法。

##### (3) 工程改建和加固，通过试验判断具体结构的实际承载能力

旧有建筑的扩建加层、加固或由于需要提高建筑抗震设防烈度而进行的加固等，对于在单凭理论计算得不到分析结论时，经常是通过试验确定这些结构的潜在能力，这在缺乏旧有结构的设计计算与图纸资料，而要求改变结构工作条件的情况下更有必要。

##### (4) 处理受灾结构和工程质量事故，通过试验鉴定提供技术依据

对遭受地震、火灾、爆炸等而受损的结构，或在建造和使用过程中发现有严重缺陷的危险建筑，例如施工质量事故、结构过度变形和严重开裂等，往往必须进行必要的详细检测。

##### (5) 鉴定预制构件的产品质量

构件厂或现场生产的钢筋混凝土预制构件，在构件出厂或在现场安装之前，必须根据科学抽样试验的原则，按照预制构件质量检验评定标准和试验规程，通过一定数量的试件试验，以推断成批产品的质量。

#### 2. 科研性试验 (science test)

科学研究性试验的目的是验证结构设计计算的各种假定，通过制定各种设计规范，发展新的设计理论，改进设计计算方法，为发展和推广新结构、新材料及新工艺提供理论依据与实践经验。

##### (1) 验证结构计算理论的假定

在结构设计中，为了计算的方便，人们经常要对结构构件的计算图式及其本构关系作某些简化的假定。例如，在较大跨度的钢筋混凝土结构厂房中采用 30~36m 跨度竖腹杆式的预应力钢筋混凝土空腹桁架 (open-web truss)。设计中，这类桁架的计算图式可假定为多次超静定的空腹桁架，也可按两铰拱计算，将所有的竖杆看成是不受力的吊杆，这一般可以通过试验研究来加以验证，构件的静力和动力分析中，本构关系 (constitutional relationship) 的模型化则完全是通过试验加以确定的。

## (2) 为发展推广新结构、新材料与新工艺提供实践经验

随着建筑科学和基本建设发展的需要,新结构、新材料与新工艺不断涌现。例如,在钢筋混凝土结构中各种新钢筋的应用,薄壁弯曲轻型结构钢的设计推广,升板滑模(life slab slip form)施工工艺的发展,以及大跨度结构,高层建筑与特种结构的设计施工等。一种新材料的应用到一个新结构的设计和新工艺的施,往往需要经过多次工程实践与科学试验,即由实践到认识,由认识到实践的多次反复,从而积累资料、丰富认识,使设计计算理论不断改进和完善。结合我国钢材生产特点,人们曾对 Q345 钢以及硅钛系或硅矾等钢的原材料和使用这类钢材的结构构件作了大量的试验。在目前高层建筑的设计与施工中筒中筒结构(tube-in-tube structure)体系进行了较多的试验研究。又如在升板结构和滑模的施工中,通过现场实测积累了大量与施工工艺有关的数据,为发展以升带滑、滑升结合的新工艺创造了条件。

### 1.3.2 按试验对象的尺寸分类

#### 1. 原型试验(prototype test)

原型试验的对象是实际结构或者是按实物结构足尺复制的结构或构件。

实物试验一般用于生产性试验,例如秦山核电站安全壳加压整体性能的试验就是一种非破坏性的现场试验。对于工业厂房结构的刚度试验、楼盖承载力试验等都是在实际结构上加载测量的。另外,在高层建筑上直接进行风振测试和通过环境随机振动测定结构动力特性等均属此类。在原型试验中,另一类就是对实际结构构件的试验,试验对象就是一根梁、一块板或一榀屋架之类的实物构件,它可以在试验室内试验,也可以在现场试验。为了保证测试的精度,防止环境因素对试验的干扰,目前国外已将这类足尺模型试验(full scale test)从现场转移到结构试验室内进行,如日本已在室内完成了 7 层框架结构房屋足尺模型的抗震静力试验。近年来国内大型结构试验室的建设也已经考虑到这类试验的要求。

#### 2. 模型试验(model test)

模型是仿照原形并按照一定的比例关系复制而成的试验代表物。它具有实际结构的全部或部分特征,但大部分结构模型是尺寸比原模型小得多的缩尺结构。试验研究需要时也可以制作 1:1 的足尺模型作为试验对象。由于受投资大、周期长、测量精度、环境因素等干扰的影响,进行原型结构试验在物质上或技术上会存在某些困难。人们在结构设计的方案阶段进行初步探索比较或对设计理论和计算方法进行探索研究时,较多地采用比原型结构小的模型进行试验。

模型的设计制作与试验是根据相似理论(similarity theory),用适当的比例和相似材料制成的与原型几何相似的试验对象,再在模型上施加相似力系使模型受力后重演原型结构的实际工作状态,最后按照相似理论由模型试验结果推算出实际结构的工作性能。为此,这类模型要求有比较严格的模拟条件,即要求做到几何相似、力学相似和材料相似。

#### 3. 小模型试验(small model test)

小模型试验是结构试验常用的形式之一。它只是将原型结构按几何比例缩小制成模型作为代表物进行试验,然后将试验结果与理论计算对比校核,用以研究结构的性能,验证设计假定与计算方法的正确性,并认为这些结果所证实的一般规律与计算理论可以推广到实际结构中去。这类试验无须考虑相似比例对试验结果的影响。正如在教学试验中通过钢

钢筋混凝土结构受弯构件的小梁试验，可以同样地说明钢筋混凝土结构正截面的设计计算理论一样。

### 1.3.3 按试验荷载的性质分类

#### 1. 结构静力试验 (static loading test of structure)

结构静力试验是结构试验中最多、最常见的基本试验，因为绝大部分建筑结构在工作中所承受的是静力荷载。在荷载作用下研究结构的承载力、刚度、抗裂性和破坏机理，一般可以通过重力或各种类型的加载设备来模拟和实现试验加载的要求。

静力试验的加载过程是使荷载从零开始逐步递增一直加到试验某一预定目标或破坏为止，也就是在一个不长的时间段内完成试验加载的全过程。人们称这种试验为结构静力单调加载试验。

近年来由于探索结构抗震性能，结构抗震试验无疑成为一种重要的手段。结构抗震静力试验是以静力的方式模拟地震作用的试验，它是一种控制荷载或控制变形作用于结构的周期性的反复静力荷载，为与一般单调加载试验区别，称之为低周反复静力加载试验 (static loading test of low cycle reverse)，也称伪静力试验 (pseudo static test)。目前国内结构抗震试验较多集中在这一方面。

静力加载试验 (static loading test) 最大的优点是加载设备相对来说比较简单，荷载可以逐步施加，还可以停下来仔细观察结构变形和裂缝的发展，给人们以最明确和清晰的破坏概念。在实际工作中，即使是承受动力荷载的结构，在试验过程中为了了解静力荷载下的工作特性，在动力试验之前往往也先进行静力试验，如进行结构构件的疲劳试验就是这样。静力试验的缺点是不能反映应变速率对结构的影响，特别是在结构抗震试验中与任意一次确定性的非线性地震反应相差很远。目前在抗震静力试验中虽然发展出一种计算机与加载器联机试验系统，可以弥补后一种缺点，但设备耗资较大，且每个加载周期还远远大于实际结构的基本周期。

#### 2. 结构动力试验 (dynamic test of structure)

结构动力试验就是研究结构在不同性质动力作用下结构动力特性 (dynamic characteristics of structure) 和动力反应 (dynamic effect of structure) 的试验。如研究厂房结构承受吊车及动力设备作用下的动力特性，吊车梁的疲劳强度 (fatigue strength) 与疲劳寿命 (fatigue life)，多层厂房由于机器设备上楼后所产生的振动影响，高层建筑和高耸构筑物在风荷载作用下的动力问题，结构抗爆炸、抗冲击问题等，特别是在结构抗震性能的研究中，除了用上述静力加载模拟以外，更为理想是直接施加动力荷载进行试验。目前抗震试验 (earthquake resistant test) 一般用电液伺服加载设备 (electro-hydraulic serve testing equipment) 或地震模拟振动台等设备来进行。对于现场或野外的动力试验，利用环境随机振动试验 (ambient random excitation test) 测定结构的动力特性模态参数也日益增多。另外，还可以利用人工爆炸产生人工地震的方法甚至直接利用天然地震对结构进行试验。由于荷载特性的不同，动力试验的加载设备和测试手段也与静力试验有很大的差别，并且要比静力试验复杂得多。

### 1.3.4 按试验时间长短分类

#### 1. 短期荷载试验 (short term loading test)

短期荷载试验是指结构试验时限于试验条件、试验时间或其他各种因素和基于及时解



决问题的需要，经常对实际承受长期荷载作用的结构构件，在试验时将荷载从零开始到最后结构破坏或某个阶段进行卸荷的时间总共只有几十分钟、几小时或者几天。当结构受地震爆炸等特殊荷载作用时，整个试验加载过程只有几秒甚至是微秒或毫秒级的时间。这种试验实际上是一种瞬态的冲击试验，属于动力试验的范畴。严格讲，这种短期荷载试验不能代表长年累月进行的长期荷载试验，对其中由于具体的客观因素或技术的限制所产生的影响，必须在试验结果的分析 and 应用时加以考虑。

## 2. 长期荷载试验 (long term loading test)

长期荷载试验是指结构在长期荷载作用下研究结构变形随时间变化的规律的试验，如混凝土的徐变、预应力结构钢筋的松弛等都需要进行静力荷载作用下的长期试验。这种长期荷载试验也可称为“持久试验”，它将连续进行几个星期或几年时间，通过试验以获得结构的变形随时间变化的规律。为保证试验的精度，对试验环境要有严格控制，如保持恒温、恒湿、防止振动影响等。所以，长期荷载试验一般是在试验室内进行的。如果能在现场对实际工作中的结构构件进行系统、长期的观测，则这样积累和获得数据资料对于研究结构的实际工作性能，进一步完善和发展结构理论将具有更为重要的意义。

### 1.3.5 按试验场所在场地分类

#### 1. 试验室结构试验 (laboratory structural test)

试验室试验由于具备良好的工作条件，可以应用精密和灵敏的仪器设备，具有较高的准确度，甚至可以人为地创造一个适宜的工作环境，以减少或消除各种不利因素对试验的影响，所以适宜于进行研究性试验。其试验的对象可以是原型或模型，并可以将结构一直试验到破坏。近年来大型结构试验室的建设，特别是应用电子计算机控制试验，为发展足尺结构的整体试验和实现结构试验的自动化提供了更为有利的工作条件。

#### 2. 现场结构试验 (field structural test)

现场结构试验是指在生产或施工现场进行的实际结构的试验，较多用于生产性试验。试验对象主要是正在生产使用的已建结构或将要投入使用的新结构。由于受客观条件的干扰和影响，高精度、高灵敏度的仪表设备的应用经常会受到限制，因此试验精度和准确度较差。特别是由于现场试验中没有试验室所用的固定加载设备和试验装置，对试验加载会带来较大的困难。但是，目前应用非破坏检测技术手段进行现场试验，仍然可以获得近乎实际工作状态下的数据资料。

建筑结构试验技术的形成与发展，与建筑结构实践经验的积累和试验仪器设备量测技术的发展是分不开的。由于结构试验的应用日益广泛，目前几乎每一个重要工程的新结构都经过规模或大或小的检验后才投入使用，建筑设计规范的制定和建筑结构理论发展亦与试验研究紧密相连。我国伟大的社会主义建设实践为结构试验积累了丰富经验，另外，近代仪器设备和量测技术的发展，特别是非电量电测、自动控制和电子计算机等先进技术和设备应用到结构试验领域，为试验工作提供了有效的工具和先进的手段，使试验的加载控制、数据采集、数据处理以及曲线图表绘制等实现了整个试验过程的自动化。国内科研机构、高等院校以及生产单位等新建的结构实验室和科技工作者对结构试验技术的研究，也为建筑结构试验学科的发展在理论和物质上提供了有利的条件。当今科学实验与试验已成为一种独立的社会实践，它将有力地推动和促进生产的发展。建筑结构试验将与其他科学实验工作一样，必然会对建筑科学的发展产生巨大的推动作用。

## 1.4 结构试验的发展

我国结构试验发展的初期，主要是为了适应国民经济恢复时期的需要，对一些改建或扩建工程进行现场静力试验。

例如，鞍山钢铁公司旧厂房改建工程、黄河铁桥加固工程等，通过现场静力试验，为改建及加固处理提供了科学依据，并为结构试验的发展积累了宝贵经验。

1953年，长春市对25.3m高的输电铁塔进行了原型结构的检验性试验，是我国第一次规模较大的结构试验。当时由于试验手段落后，加载设备是用吊盘内装铁块，作为竖向荷载，水平荷载则用人工绞车施加，铁塔主要杆件的应变只能用机械杠杆引伸仪量测，铁塔的水平变位则用经纬仪观测。

1957年，我国对武汉长江大桥全面地进行了静载和动载试验，是我国建桥史上第一次进行以工程验收为目的的结构试验。

1959年，北京火车站建造时，对中央大厅的35m×35m双曲薄壳(double curvature shallow shell)进行了静力试验。

20世纪70年代，结构试验日益成为人们研究结构新体系不可缺少的手段。从确定结构材料的物理力学性能，到验证各种结构构件的受力特点和破坏特征，直至建立一个结构体系的计算理论，都建立在试验研究的基础上。例如1973年，对上海体育馆和南京五台山体育馆进行了网架模型试验(lattice grid model test)，为建立网架结构的计算理论和模型试验理论等提供了大量实测资料。在此之后，在北京、昆明、南宁、兰州等地先后进行了十余次规模较大的足尺结构试验。

我国结构动力试验的工作起步较晚，早期主要是由科学研究机构研制一些小型振动台和起振设备，用它们对建筑物、高炉及水坝等结构模型进行动力试验。后来研制出了脉动测量仪(pulsating measurement apparatus)，开始对新安江、小丰满和恒山等地的大型水坝工程实地进行了脉动观察和测量。1960年后又研制出了我国第一批工程强震加速度计。从此，为研究实际地震作用下的结构性能开辟了新领域。

地震是土木工程结构的一个重要灾害源，我国曾进行过各种结构的抗震试验和减震试验，如钢筋混凝土框架、剪力墙等结构的抗震性能试验，砖砌体和砌块结构以及底层框架砖混结构的抗震性能试验。在野外进行的规模较大的足尺房屋抗震性能破坏试验就有十多次。

1973年北京进行了装配整体式框架结构(两层、一开间)抗震试验。

1978年兰州进行了粉煤灰密实砌块结构(五层、三开间)抗震试验。

1979年上海进行了中型砌块结构的抗震试验。

1982年中国建筑科学院对12层轻板框架结构模型进行的抗震试验。

1991年西安建筑科技大学对砖混结构(空心砖)模型(六层、二开间)进行的抗震试验。

现在，全国各地进行的各种类型的结构试验日益增多，试验项目不胜枚举。其结果为研究发展抗震计算分析理论和指导工程应用提供了十分丰富的试验资料。

近年来，大型结构试验机、模拟地震台、大型起振机、高精度传感器、电液伺服控制

加载系统、信号自动采集系统等各种仪器设备和测试技术的研制，以及大型试验台座的建立，从根本上改变了试验加载的技术，实现了量测数据的快速采集、自动化记录和数据自动处理分析等；尤其计算机控制的多维地震模拟振动台可以实现地震波的人工再现，模拟地面运动对结构作用的全过程，可以准确、及时、完整地收集并表达荷载与结构行为的各种信息。

目前结构试验技术正在向智能化、模拟化方向深入发展，不断引入现代科学技术发展的新成果来解决应力、位移、裂缝、内部缺陷及振动的量测问题，与此同时，正在广泛地开展结构模型试验理论与方法的研究、计算机模拟试验及结构非破损试验技术的研究等。随着智能仪器的出现，计算机和终端设备的广泛应用，各种试验设备自动化水平的提高，将为结构试验开辟新的广阔前景。

### 本章小结

1. 结构试验的任务就是在结构物或试验对象上，使用仪器设备和工具，采用各种实验技术手段，在荷载或其他因素作用下，通过量测与结构工作性能有关的各种参数，从强度、刚度和抗裂性以及结构实际破坏形态来判明结构的实际工作性能，估计结构的承载力，确定结构对使用要求的符合程度，并用以检验和发展结构的计算理论。

2. 根据不同的试验目的，结构试验可归纳为生产性试验和科研性试验两大类。生产性试验经常具有直接的生产目的，它以实际建筑物或结构构件为试验鉴定对象，经过试验对具体结构构件作出正确的技术结论。科学研究性试验的目的是验证结构设计计算的各种假定，为制定各种设计规范、发展新的设计理论、改进设计计算方法、发展和推广新结构、新材料及新工艺提供理论依据与试验依据。

3. 结构试验除了按试验目的分为生产性试验和科研性试验外，还可按试验对象的尺寸分为原型试验、模型试验；按试验荷载的性质分为结构静力试验、结构动力试验；按试验时间长短分为短期荷载试验、长期荷载试验；按试验场所分为试验室结构试验、现场结构试验。

### 思考题

1. 结构试验的任务是什么？
2. 建筑结构试验分为几类？有何作用？
3. 目前建筑结构测量技术有何发展？



## 第2章 结构试验设计

### 2.1 结构试验设计的一般程序

建筑试验大致可分为结构试验设计、结构试验准备、结构试验实施以及结构试验分析等主要环节。每个环节的关系如图 2-1 所示。

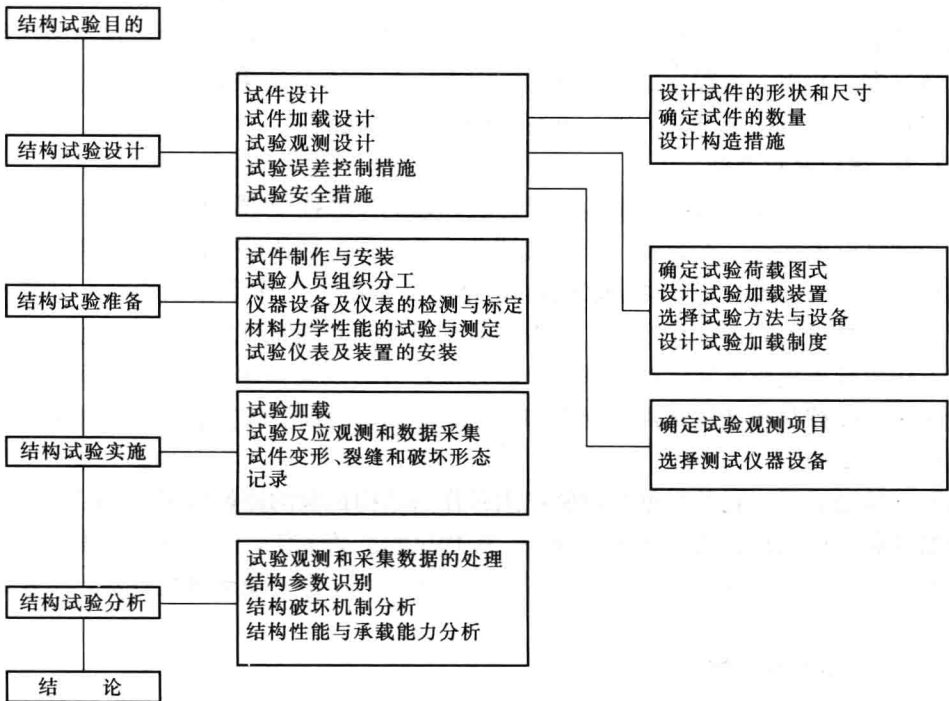


图 2-1 结构设计总框图

#### 2.1.1 结构试验设计

结构试验设计是整个结构试验中极为重要并且带有全局性的一项工作。它的主要内容是对所要进行的结构试验工作进行全面的设计与规划，从而使设计的计划与试验大纲能对整个试验起着统管全局和具体指导的作用。

在进行结构试验的总体设计时，首先应该反复研究试验的目的，充分了解本项试验研究或生产鉴定的任务要求，进行调查研究，收集有关资料，包括在这方面已有哪些理论假定，做过哪些试验及其试验方法、试验结果和存在的问题等等。在以上工作的基础上确定试验的性质与规模。试验结果试件的设计制作、加载量测方法的确定等各个环节不可孤立考虑，而必须对各种因素相互联系综合考虑才能使设计结果在执行与实施中最后达到预期的目的。